

電子サイクロトロン波の偏波方向反転とプラズマ電位構造制御

著者	高橋 和貴
号	51
学位授与番号	3671
URL	http://hdl.handle.net/10097/37339

氏名	たか はし かず のり 高 橋 和 貴
授与学位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成18年9月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学位論文題目	電子サイクロトロン波の偏波方向反転とプラズマ電位構造制御
指導教員	東北大学教授 畠山 力三
論文審査委員	主査 東北大学教授 畠山 力三 東北大学教授 犬竹 正明 東北大学教授 澤谷 邦男 東北大学助教授 飯塚 哲 東北大学助教授 金子 俊郎

論文内容要旨

第1章 序論

磁化プラズマ中を伝搬する電磁波特有の現象として知られる電子サイクロトロン共鳴 (ECR) は, 効率よく波動から電子へとエネルギーを伝達できるため, 電子加熱や低圧下におけるプラズマ生成に有効である. 従来 ECR には右旋偏波のみが関与すると考えられてきたが, 近年の実験においてヘリカルアンテナで励起した左旋偏波も ECR 点で減衰することが観測されており, その吸収領域が右旋偏波に比べて局所的であるため, 局所電子加熱に有用であると期待されている.

また, 不均一磁化プラズマ中で ECR 加熱を行った場合には, ECR 点近傍に特異な電位構造が形成されることが報告されており, 核融合プラズマの閉じ込め電位形成に対して有用であると考えられている. ここで形成されるプラズマ電位構造には, ECR 点近傍における電磁波の伝搬, 吸収特性が大きく寄与すると考えられるが, 電位形成と波動伝搬の関連性を体系的に調べた実験は未だ報告されていない. またここで形成される電位障壁に対しては, 磁化プラズマ中の沿磁力線イオンフローエネルギーが大きく関与していると考えられているが, 実験的な検証には至っていない.

以上のように, ECR に関与する波動伝搬と電位構造形成に関して個別に研究が進められてきたが, 両者共に解決すべき課題が数多く残されており, それらを体系的に解明することが重要である. そこで本論文では, これまで未解明であった ECR 点近傍における左旋偏波の減衰機構, 及び ECR に伴う電位形成機構の詳細を解明することを目的とする. さらに, 波動伝搬と電位形成の関連性について体系化すると共に, 最終的には波動の伝搬特性を利用したプラズマ電位構造制御を実現することを目的とする.

第2章 理論, 解析

実験室プラズマ中を伝搬する電磁波は境界条件の影響を受けるため, その伝搬特性を従来の無境界プラズマ中の波動解析では記述することが出来ず, 境界条件の効果を導入する必要がある. 磁力線垂直方向波数 k_{\perp}

の値が制限されるという境界条件を導入した波動解析法について示している。

第3章 各種計測方法

ラングミュアプローブ、静電イオンエネルギーアナライザを用いて電子密度、電子温度、空間電位、イオンエネルギー分布関数の各種プラズマパラメータの測定が可能となる。また、ダイポールアンテナを用いてプラズマ中を伝搬する電磁波の各方向電場の振幅、位相の空間分布の計測を実現している。

第4章 プラズマ源

プラズマ中の波動伝搬に関する実験では、電子密度が 10^{11} cm^{-3} 程度の高密度熱陰極直流放電をプラズマ源として用いた。一方、電位形成が関与する実験で用いるプラズマ源として、図 1 に示すようなイオンフロー制御型プラズマ源を新規に開発した。プラズマ源は、イオン生成部 (領域 A) とプラズマ合成部 (領域 B) から構成されており、領域 A からのイオンとメッシュ状電子源 (メッシュエミッタ) から放出した熱電子を合成することで領域 B にプラズマ流を生成している。ここで、領域 A から領域 B へ流入するイオンのエネルギーは、図 1 に

示した電位 ϕ のモデル図のように領域 A と B の空間電位差で決定されるため、領域 A の空間電位のみをアノード電位 V_a によって制御することでイオンフローエネルギーの制御が可能となる。

第5章 電子サイクロトロン周波数帯 $m = 0$ モード左旋偏波の偏波方向反転

不均一磁場配位下でヘリカルアンテナを用いて、従来 ECR に関与しないとされる左旋偏波を入射した場合に ECR 点において波動が減衰することが観測されている。その減衰機構を解明するために、図 2(a) に示すような不均一磁場配位の強磁場側 ($z = 0 \text{ cm}$) からヘリカルアンテナを用いて左旋偏波を入射し、マイクロ波電場の空間構造を測定した。 E_x と E_y の干渉波形の測定結果を図 2(b) に示す。図 2(c) には、図 2(b) の波形に含まれる長波長成分 (LW) と短波長成分 (SW) を示す。図 2(b) より、入射した波動が ECR 点で局所的に減衰している

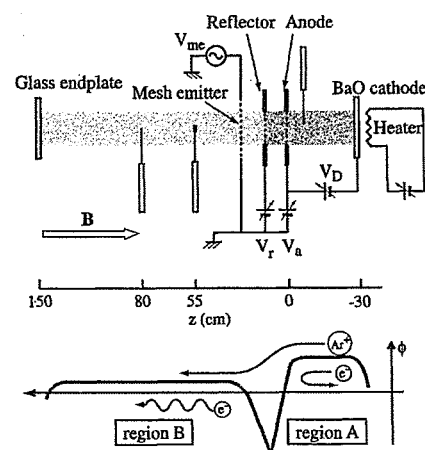


図 1：イオンフロー制御型プラズマ源概略図、及び軸方向電位分布モデル図。

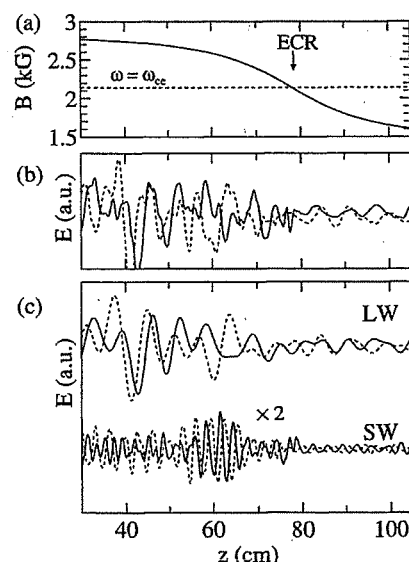


図 2：(a) 外部印加磁場配位。(b) E_x (点線) と E_y (実線) の干渉波形。(c) 干渉波形から求めた長波長 (LW)、短波長 (SW) 成分。

ことが分かる．図 2(c)を見ると，伝搬上流域 ($z < 55$ cm) では長波長成分が支配的であるが， $z = 60$ cm 近傍から短波長成分が支配的になっており，更に E_x と E_y の位相差から，長波長成分は左旋偏波，短波長成分は右旋偏波であることが明らかになった．これより，軸方向に沿って波動の偏波方向が反転する『軸方向偏波反転』が起き，その結果入射した波動が ECR 点で減衰することが明らかになった．また，方位角方向モード数 m を測定したところ $m = 0$ モードが励起されていることが観測された．

上述の軸方向偏波反転を解釈するために，境界条件を考慮した波動解析を行った．図 3(a)に左旋(●)および右旋(□)偏波成分分散関係の測定値，及び理論値(実線)を示す．左旋，右旋偏波の測定値はともに遅波の理論値に一致していることが分かる．また，図 3(b)には $m = 0$ モードにおける偏波方向 S の理論値を示す．ただし， $S > 1$ ， $S < 1$ はそれぞれ左旋偏波，右旋偏波を表している．これより，強磁場側 ($\omega/\omega_{ce} < 0.85$) においては $S > 1$ であるが，ECR 点近傍 ($\omega/\omega_{ce} > 0.85$) では $S < 1$ となり偏波方向が反転していることから，軸方向偏波反転は境界条件を考慮することで説明できることを明らかにした．

第6章 $m = \pm 1$ モード電磁波の伝搬・偏波特性

大電力マイクロ波を入射した際のプラズマ中の構造形成と波動伝搬の体系的解明のため，イオンフロー制御型プラズマ源により生成したプラズマ中に，ホーンアンテナを用いて $m = \pm 1$ モードのマイ

クロ波を入射し，その波動伝搬，吸収特性について調べた．図 4 に(a) $m = +1$ モード，(b) $m = -1$ モードを励起した場合の， E_x と E_y の位相差 $\Delta\theta$ の半径方向分布測定結果を示す．ここで， $\Delta\theta$ の符号から電磁波の偏波方向を同定でき， $\Delta\theta < 0$ (図中灰色の領域)が右旋偏波， $\Delta\theta > 0$ が左旋偏波を表している．また図中実線は，偏波方向 S の計算結果を表す．これより，径方向位置に沿って偏波方向が反転する『径方向偏波反転』の結果， $m = +1$ モードにおいてはプラズマ断面の中心領域， $m = -1$ においては周辺領域で右旋偏波となることが実験的・理論的に明らかになり，更にこれらの領域で選択的に波動が吸収されることが観測されている．従って，マイクロ波の入射モードにより偏波方向分布，及び波動の吸収領域を選択できることが明らかになった．

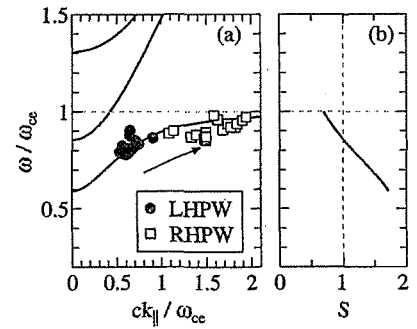


図 3: (a)左旋(●)，右旋(□)偏波成分分散関係の測定値，及び理論値(実線)．(b)偏波方向理論値．

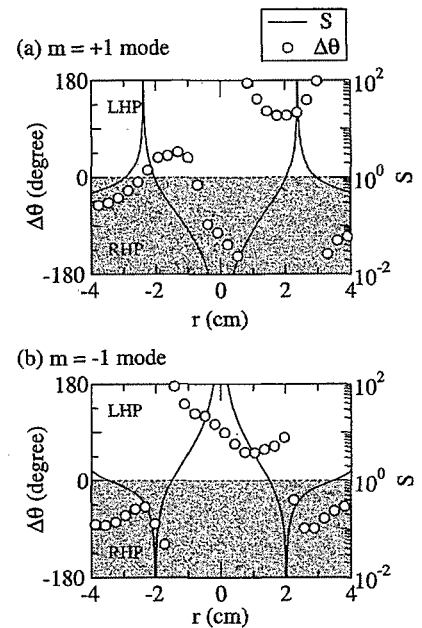


図 4: E_x と E_y の位相差 $\Delta\theta$ の半径方向分布測定結果(○)，及び偏波方向 S の計算結果．図中灰色の領域が右旋偏波を表す．(a) $m = +1$ モード励起，(b) $m = -1$ モード励起．

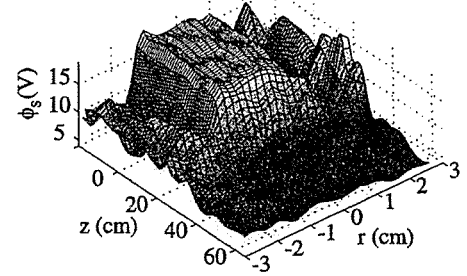
第7章 ECRHに伴うダブルレイヤー形成と波動伝搬の体系的解明

マイクロ波の入射モードによるプラズマ中電位構造制御の実証を目的として、 $m = \pm 1$ モードの電磁波を選択的に入射した際のプラズマ構造の計測を行った。図5に、 $z = -25$ cm から $m = \pm 1$ モードの電磁波を入射した際の空間電位 r - z 分布測定結果を示す。第6章で示したように、 $m = +1$ モードではプラズマ断面の中心領域、 $m = -1$ モードでは周辺領域で波動吸収、及び電子加熱が起こるため、図5のようにそれぞれ中心、周辺領域で ECR 点 ($z = 26$ cm) 近傍にダブルレイヤーと呼ばれる電位構造が形成されることを明らかにし、マイクロ波入射モードによるプラズマ電位構造制御を実現した。さらに、ここで形成される電位構造へのイオンフローエネルギーの効果を検証するために、第2章で示したイオンフロー制御型プラズマ源を用いて、 $m = +1$ モード入射時の空間電位軸方向分布の V_a 依存性、すなわちイオンフローエネルギー依存性を測定したところ(図6)、ダブルレイヤーの電位の高さがイオンフローエネルギーにほぼ比例することが明らかになり、これはプラズマ流下流側 ($z < 26$ cm) で電気的中性条件を満足するように自己無撞着に決定されることを示している。

第8章 結論

本論文は高効率プラズマ加熱、生成法として大きな可能性を持つ電子サイクロトロン波の伝搬・減衰機構、及び ECR に伴うプラズマ中電位構造形成に関する研究成果をまとめたものである。これまで未解明であった左旋偏波の減衰機構解明を目的とし、実験・理論解析を行い、 $m = 0$ モードにおける左旋偏波から右旋偏波への軸方向偏波反転に起因する ECR 減衰を証明し、新たなプラズマ中波動吸収機構を提唱している。また、 $m = \pm 1$ モードにおいては径方向偏波反転により波動のプラズマ断面内での吸収領域が異なることを明らかにした。さらに、この波動伝搬特性を利用したプラズマ中電位構造制御法を新たに提案し、その物理機構の詳細を解明している。従って、本研究の成果はプラズマ構造制御、高効率加熱法として大きな可能性を示すものと考えられる。

(a) $m = +1$ mode



(b) $m = -1$ mode

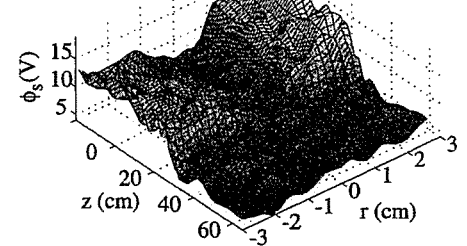


図5:空間電位 r - z 分布測定結果. (a) $m = +1$ モード, (b) $m = -1$ モード.

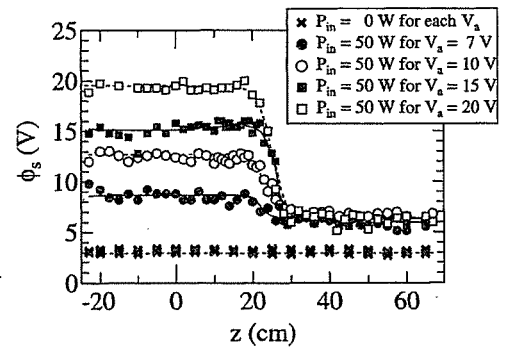


図6: $m = +1$ モード入射時の $r = 0$ cm における空間電位軸方向分布のイオンフローエネルギー依存性.

論文審査結果の要旨

磁化プラズマ中の電子サイクロトロン共鳴 (ECR) に関与する電磁波とプラズマ構造形成に関する研究は、制御熱核融合や材料・デバイスプロセス、宇宙推進技術など多くの研究分野において重要な課題となっている。本論文は、偏波方向反転に起因する $m = 0$ モード左旋偏波の ECR 減衰特性 (m : 方位角方向モード数)、および $m = \pm 1$ モード電磁波の伝搬と ECR 減衰特性を初めて明らかにすると共に、 $m = \pm 1$ モード電磁波の吸収特性の差異を利用したプラズマ中電位構造制御を初めて実証し、その物理機構に関する研究結果をまとめたもので、全編 8 章から成る。

第 1 章は序論であり、本研究の目的と意義を明らかにしている。

第 2 章では、磁化プラズマ中の電磁波を記述するための、波動解析理論について述べている。

第 3 章では、プラズマパラメータ、およびマイクロ波の測定方法について記述している。

第 4 章では、本実験で用いたプラズマ源の原理、基礎特性について述べている。熱陰極直流放電による均一なプラズマ生成に加えて、新たに開発したイオンフロー制御型プラズマ源について示している。イオンフロー制御型プラズマ源は、磁化プラズマ中の沿磁力線イオンフローエネルギーの精密な制御を実現しており、注目に値する。

第 5 章では、 $m = 0$ モード左旋偏波の線形伝搬・減衰機構について述べている。従来 ECR に関与しないと考えられてきた $m = 0$ モードの左旋偏波が ECR 点で減衰し、この現象が軸方向位置に沿って偏波方向が変化する『軸方向偏波反転』に起因しているという新たな実験事実を見出している。この軸方向偏波反転に対して、境界条件を導入した解析を行うことで理論的解釈を与えている。これは高く評価できる。

第 6 章では、 $m = \pm 1$ モード波動の伝搬・減衰特性について述べている。 $m = \pm 1$ モードの場合には半径方向で偏波方向が反転する『径方向偏波反転』が起こることを実験、理論解析により明らかにしている。更に、この偏波特性に起因して、 $m = +1$ モードの場合はプラズマ断面の中心領域で、 $m = -1$ モードの場合には周辺領域で波動が吸収されるという実験事実を示しており、入射モードによって波動吸収領域を制御できることを実証している。

第 7 章では、第 6 章で示した入射モードによる波動吸収領域の差異を利用して、プラズマ中電位構造制御を実現している。ECR 点近傍において波動の非線形性によって形成されるダブルレイヤー(電気二重層)と呼ばれる電位構造を、空間的に制御して実現できることを明らかにし、その電位構造へのイオンフローエネルギーの効果を実験的に調べることで物理機構を明らかにしている。これは高く評価できる。

第 8 章は結論である。

以上要するに本論文は、磁化プラズマ中の ECR 周波数帯電磁波に関する詳細な実験を行い、各種モードにおける偏波方向反転に関連した波動吸収特性を論じると共に、それらの波動を用いたプラズマ中電位構造制御を実証し、それらの物理機構を解明したもので、電子工学およびプラズマ理工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。